



TRABAJO FIN DE MASTER
(Curso 2009-2010)

MASTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS MECÁNICOS
PROGRAMA OFICIAL DE POSGRADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA Y DE MATERIALES

DISEÑO Y ESTUDIO DE UN VEHÍCULO COMERCIAL LIGERO CON SISTEMA DE PROPULSIÓN ALTERNATIVO NO CONTAMINANTE

Autor: Alberto Fraile Del Pozo

Director: Dr. Ing. Ind. Emilio Larrodé Pellicer

Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Universidad de Zaragoza.

Zaragoza, Septiembre 2010

DISEÑO Y ESTUDIO DE UN VEHÍCULO COMERCIAL LIGERO CON SISTEMA DE PROPULSIÓN ALTERNATIVO NO CONTAMINANTE

RESUMEN

En este trabajo se establece una pauta para el dimensionamiento del sistema energético de un vehículo comercial ligero de hasta 3,5 toneladas, basado en una fuente de energía principal, que también incorpore una fuente secundaria que complemente a la principal para satisfacer la demanda de energía total del vehículo, así como analizar la viabilidad de dicha arquitectura. El resultado será óptimo y conllevará una reducción de consumos y de emisiones. Los objetivos energéticos deseados vendrán dados por las características del vehículo y las prestaciones demandadas.

Este tipo de vehículos es especialmente sensible a mejoras que permitan disminuir el consumo, ya que el ahorro de combustible tiene una repercusión directa sobre el beneficio operativo de la empresa.

La principal herramienta utilizada en este TFM es la aplicación informática “Advisor” (Advanced Vehicle Simulator), con la que se simulan los distintos vehículos.

Se analizan los conceptos de hibridación y los distintos sistemas de almacenamiento de energía en vehículos. Posteriormente, se plantean una serie de especificaciones técnicas y prestaciones a cumplir, basadas en los vehículos actuales de la misma gama, y se simulan diferentes vehículos con distintas arquitecturas energéticas, partiendo del vehículo convencional como situación inicial, pasando por el vehículo híbrido y por el eléctrico puro, hasta llegar al vehículo de pila de combustible.

Se justifica mediante sucesivas simulaciones la selección de la configuración más energéticamente eficiente para los vehículos comerciales ligeros de hasta 3,5 toneladas, tanto en ciclo urbano (vehículo eléctrico con baterías de ión-litio) como en un ciclo combinado (vehículo con pila de hidrógeno y baterías de ión-litio), y se plantean varias alternativas de mejora a partir de dichas configuraciones.

Por último, utilizando los vehículos con las configuraciones óptimas elegidas, se realiza un estudio de ahorro de consumos y emisiones para los próximos 10 años en una empresa que dispone de una flota de 10 camiones. Se observa que a partir del noveno año, dicha empresa empezaría a ahorrarse dinero progresivamente, ya que durante los años anteriores tendría que hacer frente al alto coste inicial de los vehículos no contaminantes. En cuestiones medioambientales, se consiguen emisiones nulas de contaminantes, al menos durante la circulación con los vehículos seleccionados, pero se puede discutir acerca de la contaminación generada durante la producción de la electricidad y del hidrógeno, que variará según el método utilizado en su obtención, si bien los elevados rendimientos del vehículo eléctrico y del vehículo de pila de combustible pueden contrarrestar dicha circunstancia.

ÍNDICE

1. Introducción	4
2. Concepto de vehículo híbrido. Descripción del funcionamiento y tipos de configuraciones	6
3. Análisis de sistemas de almacenamiento y producción de energía en vehículos híbridos y eléctricos	9
4. Estudios previos relacionados. Artículos científicos	10
5. Análisis de los modelos eléctricos e híbridos existentes en el mercado	11
6. Especificaciones técnicas del vehículo a simular	12
7. Ciclos de funcionamiento	13
8. Descripción, análisis y evolución justificada de alternativas según el sistema propulsor del vehículo: convencional, híbrido, eléctrico puro y con pila de combustible	14
9. Descripción de los diferentes tipos de vehículos de pila de combustible según el sistema de almacenamiento seleccionado	19
10. Análisis y optimización del sistema energético, y selección de la alternativa óptima entre los vehículos propuestos	20
11. Estudio del ahorro de emisiones y gastos conseguido con el vehículo dimensionado	21
12. Conclusiones	23
13. Futuras líneas de investigación	24
14. Bibliografía	25
Anexos	26

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es establecer una pauta para el dimensionamiento del sistema energético de un vehículo comercial ligero de hasta 3,5 toneladas, basado en una fuente de energía principal, que también incorpore una fuente secundaria que complemente a la principal para satisfacer la demanda de energía total del vehículo, así como analizar la viabilidad de dicha arquitectura. El resultado será óptimo y conllevará una reducción de consumos y de emisiones. Los objetivos energéticos deseados vendrán dados por las características del vehículo y las prestaciones demandadas.

Este tipo de vehículos es especialmente sensible a mejoras que permitan disminuir el consumo, ya que el ahorro de combustible (y, por lo tanto, de coste) tiene una repercusión directa sobre el beneficio operativo de la empresa.

La justificación de este proyecto es la inminente proliferación de vehículos híbridos y de pila de combustible en los que el dimensionamiento de los sistemas energéticos es un aspecto clave, así como la necesidad creciente de conseguir una reducción de consumos y emisiones contaminantes. La problemática de un dimensionamiento que establezca la proporción entre los elementos del sistema energético no aparece en los vehículos convencionales, puesto que su sistema energético consta de un único elemento, el motor alternativo de propulsión interna.

El alcance de este proyecto es realizar una aproximación inicial en la que se analicen los conceptos y sistemas relativos al estudio, justificar la evolución hasta seleccionar un vehículo óptimo y plantear varias alternativas a partir de dicho vehículo. Se analizarán dos casos prácticos, uno en trazado urbano y otro con tramos urbanos y suburbanos, y se elegirá el mejor vehículo para cada caso. Por último, con los vehículos seleccionados se realizará un estudio de ahorro de consumos y emisiones para los próximos 10 años.

El contexto en el que se desarrolla el proyecto es el Grupo de Ingeniería GITEL (Grupo de Ingeniería del Transporte y la Logística), en el Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes del Departamento de Ingeniería Mecánica del Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza.

La principal herramienta utilizada es la aplicación informática “Advisor” (Advanced Vehicle Simulator), basada en “Matlab-Simulink”, con la cual se llevan a cabo las simulaciones de los vehículos.

En primer lugar se aborda el concepto de vehículo híbrido y se describe su funcionamiento según las diferentes configuraciones. Se comentarán estudios previos relacionados que puedan ser de interés y se analizarán los sistemas de almacenamiento y producción de energía en vehículos híbridos y eléctricos.

Se analizarán los diferentes escenarios y ciclos de funcionamiento en los que llevan a cabo las simulaciones. Se describirán vehículos eléctricos e híbridos actuales, atendiendo a sus sistemas componentes y características principales, a partir de las cuales se establecerán las principales especificaciones técnicas del vehículo a simular en el estudio.

Se justifica la evolución del tipo de sistema energético, partiendo del vehículo convencional como situación inicial, pasando por el vehículo híbrido y por el eléctrico puro, hasta llegar al vehículo de pila de combustible. Para ello se describe y analiza cada una de las citadas alternativas.

Así, una vez justificada dicha evolución, se selecciona para cada uno de los ciclos propuestos que tipo de vehículo es el mejor, y posteriormente se proponen varias configuraciones según el sistema de almacenamiento de energía utilizado, describiéndose las características y curvas de funcionamiento de los componentes de su sistema energético. Se optimiza cada una de estas configuraciones para, posteriormente, analizar los resultados y seleccionar la mejor alternativa atendiendo principalmente a la eficiencia energética.

Una vez determinada la mejor opción para cada caso, se procede a realizar un estudio sobre el ahorro tanto económico como medioambiental que lograría una empresa durante los próximos 10 años si cambiase sus vehículos actuales por los elegidos en este trabajo.

Por último, se plantean varias líneas futuras de investigación para el desarrollo de una posible tesis doctoral relacionadas con este trabajo fin de máster.

El Anexo I profundiza más en los tipos de vehículos híbridos y su funcionamiento. En el Anexo II se analizan los sistemas de almacenamiento y producción de energía más comunes. El Anexo III complementa la información relativa a estudios previos relacionados. En el Anexo IV se pueden encontrar gráficas y datos de interés con relación a los ciclos de funcionamiento. El Anexo V amplía el apartado de análisis de modelos eléctricos e híbridos actuales. En el Anexo VI aparece el proceso completo mediante el cual se llevan a cabo las simulaciones en la aplicación informática “Advisor”. En el Anexo VII se completa la información acerca de los resultados de las simulaciones de cada vehículo. El Anexo VIII muestra gráficas y resultados de la estimación del ahorro de consumos y de emisiones.

2. CONCEPTO DE VEHÍCULO HÍBRIDO. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO Y TIPOS DE CONFIGURACIONES

2.1. CONCEPTO DE VEHÍCULO HÍBRIDO

El concepto de “híbrido” aplicado a un vehículo se utiliza en ocasiones sin reparar en el sentido estricto del mismo, por lo que se ha considerado oportuno realizar un análisis de dicho concepto. Desde un punto de vista riguroso se considera híbrido todo aquel vehículo que cuente con más de un tipo de sistema de producción o almacenamiento de energía. Sin embargo, también está extendida la idea de vehículo híbrido como aquel que cuenta al mismo tiempo con un sistema de tracción eléctrica y otro basado en un motor térmico.

A la vista de esta diversidad de interpretaciones, se decide, con el fin de lograr la mayor claridad posible, establecer los dos siguientes subgrupos de vehículos híbridos según los componentes con que cuentan:

- *Vehículo híbrido según sistema energético:*

Vehículos que cuentan con más de un tipo de sistema de energía, ya sea éste de producción o de almacenamiento.

- *Vehículo híbrido según motorización:*

Vehículos que cuentan al mismo tiempo con un sistema de tracción eléctrico y otro basado en un motor térmico.

Cualquier vehículo híbrido se puede enmarcar, al menos, en uno de los dos subgrupos. Un ejemplo para el primer tipo podría ser un vehículo que, montando únicamente un motor eléctrico, contara tanto con una pila de combustible como con una batería en su sistema energético. Para el segundo caso se podría considerar cualquiera de los vehículos híbridos comercializados en la actualidad, en los que aparece motor térmico y eléctrico.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO Y TIPOS DE CONFIGURACIONES

El funcionamiento del sistema de energía de un vehículo híbrido está intrínsecamente ligado a su configuración, puesto que ésta condiciona los modos en los que dicho sistema puede operar. Se presentan en las siguientes páginas los dos tipos de configuraciones principales así como sus ventajas e inconvenientes. Además se muestran los modos de funcionamiento en que cada configuración potencialmente puede operar (ya que según como se implemente el sistema energético, es posible que un vehículo no pueda funcionar en alguno de los modos descritos para su configuración).

2.2.1. Configuración en serie

Vehículo en el que el sistema de producción alimenta al sistema de almacenamiento de energía, el cual proporciona a su vez energía al sistema de tracción, típicamente un motor eléctrico. Sus modos de funcionamiento son los siguientes:

Modo funcionamiento normal: el sistema de producción alimenta el sistema de almacenamiento de energía y éste al motor, sin producirse exceso o defecto en el balance energético.

Modo sólo eléctrico: el sistema de producción no opera y se consume la energía del sistema de almacenamiento de energía para alimentar el motor eléctrico. Normalmente se da cuando las exigencias son muy bajas.

Modo funcionamiento y recarga de baterías: el sistema de producción genera energía con la que alimenta el motor y, al mismo tiempo, recarga el sistema de almacenamiento de energía.

Modo frenado regenerativo: en momentos de excedente de energía – frenadas o descensos – el motor (o generador en caso de existir) recarga el sistema de almacenamiento de energía.

Modo recarga estacionaria: el vehículo no se mueve y el sistema de producción de energía recarga el sistema de almacenamiento.

Ventajas configuración serie:

- El sistema de producción puede operar siempre en su punto de funcionamiento óptimo ya que no está directamente unido a la transmisión.
- El sistema es menos complejo que el paralelo; la libertad en el diseño es mayor al no existir acoplamiento mecánico entre elementos y según el motor eléctrico usado, se puede llegar incluso a prescindir de caja de cambios.

Inconvenientes configuración serie:

- Tanto motor eléctrico como baterías (en caso de incorporarlas) deben dimensionarse para satisfacer la máxima demanda de potencia, a diferencia de la configuración paralelo, con los que sus pesos y costes aumentan.
- En caso de montar un motor térmico como sistema de producción de energía, la doble conversión de energía mecánica-eléctrica-mecánica disminuye el rendimiento en comparación con un vehículo convencional en situaciones como por ejemplo velocidad constante.
- Molestias del tipo acústico (en caso de montarse motor térmico) debido a su operación a velocidad de giro constante con el vehículo estacionario.

2.2.2. Configuración en paralelo

Vehículo que cuenta con varios sistemas de producción o generación de energía y es capaz de ser propulsado gracias a la contribución de cualquiera de ellos de manera individual o bien simultáneamente, sumándose sus aportaciones. En la actualidad es la configuración más usada, si bien existen varias versiones del mismo. Sus modos de funcionamiento son los siguientes:

Modo sólo eléctrico: similar al de la configuración serie.

Modo sólo motor térmico: el vehículo es impulsado únicamente por su motor térmico, operando de igual modo que si se tratase de un modelo convencional.

Modo motor térmico más recarga del sistema de almacenamiento: se produce cuando, operando en el modo anterior, hay un exceso de producción de energía, la cual se utiliza para la recarga del sistema de almacenamiento.

Modo motor térmico más motor eléctrico: se da cuando los requerimientos son máximos y ambos motores suman sus contribuciones.

Modo frenado regenerativo: similar al de la configuración serie.

Modo recarga estacionaria: similar al descrito en la configuración serie.

Ventajas configuración paralelo:

- Mayor eficiencia que la configuración serie, pues sólo existe una conversión de energía mecánica-eléctrica.
- El tamaño de los componentes puede ser menor, ya que al poder sumar sus contribuciones, no tienen por qué ser capaces de satisfacer la demanda energética por sí solos.

Inconvenientes configuración paralelo:

- El sistema de transmisión se puede complicar con varios embragues y reductores según la configuración. La existencia de acoplamientos mecánicos disminuye la flexibilidad en el diseño. Además es poco recomendable, a diferencia de la configuración serie, montar elementos de alta velocidad de giro, como por ejemplo turbinas, por hacerse necesario el uso de reductores poco eficientes.
- Comparado con un vehículo convencional en carretera y a velocidad constante, apenas mejora sus resultados en cuanto a eficiencia.

En el Anexo I se profundiza más en la explicación de ambas configuraciones.

3. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS

En este apartado se analizan los sistemas de almacenamiento y producción de energía susceptibles de ser utilizados en vehículos híbridos. Para ello se establece la siguiente clasificación:

- *Sistemas primarios o activos:* son aquellos que son capaces de proporcionar energía a partir de un proceso termoquímico, físico o mecánico por sí mismos. Un ejemplo lo constituye la pila de combustible.

- *Sistemas secundarios o pasivos:* son aquellos que se limitan a almacenar energía en una forma determinada y cederla en otro momento en esa misma forma. Es decir, se limitan a tomar y ceder cantidades de energía a modo de reserva. Un ejemplo lo constituyen las baterías convencionales.

A continuación se muestran los principales sistemas primarios y secundarios incluidos en este estudio por medio de una tabla. En el Anexo II se incluye un estudio en profundidad de cada uno de estos sistemas.

SISTEMAS DE ENERGÍA PRIMARIOS	Pila de combustible
	Motor térmico
	Baterías máquina (tipo Na-S)
	Baterías de Na-NiCl
	Baterías de Li-FeS
	Baterías de Li-Polímero Sólido
	Baterías de Zn-Br
SISTEMAS DE ENERGÍA SECUNDARIOS	Disco de inercia (flywheel)
	Supercondensador (ultracapacitor)
	Sistema neumático (aire comprimido)
	Sistema hidráulico
	Baterías de Plomo-ácido
	Baterías de NiCd
	Baterías de Ni-mh
	Baterías de Ión-Li
	Baterías de Zn-aire
	Baterías de Al-aire

Tabla 3.1. Sistemas de energía primarios y secundarios. Fuente propia.

4. ESTUDIOS PREVIOS RELACIONADOS. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

En este apartado se muestran los resultados de la búsqueda de estudios previos relacionados. Debido a que el tema sobre el que versa este trabajo no ha sido estudiado exhaustivamente hasta la fecha, se han encontrado pocos trabajos previos relacionados.

Se exponen a continuación las conclusiones más interesantes de alguno de los estudios, si bien se puede encontrar información ampliada en el Anexo III, y otros artículos en la bibliografía (capítulo 14).

1. *“Hybridization of energy sources in electric vehicles”*, publicado en el “Energy: Conversion and management” journal.

Propone utilizar dos sistemas de energía en un vehículo eléctrico puro, uno de alta densidad de energía y otro de alta densidad de potencia.

Conclusión: necesidad de utilizar dos sistemas de energía. Una vez seleccionados, se deben dimensionar buscando un compromiso entre consumo y autonomía.

2. *“Optimum Design of Hybrid Powertrain Systems for Non Emission Vehicles”*, publicado en el “SAE International”.

Se busca obtener la proporción óptima, desde el punto de vista de la eficiencia energética, entre sistema de energía principal y auxiliar según el ciclo de funcionamiento

Conclusión: la importancia de realizar un correcto dimensionamiento energético de los vehículos, ya que se pueden obtener diferencias de consumo con la opción óptima de hasta 2,75 veces.

3. *“Super-capacitor Integration into Hybrid Vehicle Power Source”*, publicado en el “Renewable Energy and Power Quality Journal”.

Se trata de un estudio sobre la integración de supercondensadores en los vehículos híbridos enchufables para mejorar su rendimiento en diferentes ciclos de funcionamiento

Conclusión: la integración de la tercera fuente de alimentación, en este caso supercondensadores, en diseño moderno con la transmisión eléctrica no cambia considerablemente los parámetros de los componentes principales.

5. ANÁLISIS DE MODELOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS EXISTENTES EN EL MERCADO

Llegado a este punto en el que ya se han introducido los conceptos de vehículo híbrido, se procede a realizar un análisis de los vehículos híbridos actuales para, posteriormente y con el apoyo de dicho estudio, establecer las especificaciones técnicas del vehículo a simular en los siguientes apartados.

Para este análisis se han establecido las siguientes categorías: “eléctrico con baterías” e “híbridos”. A continuación se presentan las tablas con las características más interesantes de cara a este estudio de los vehículos pertenecientes a las categorías “eléctricos con baterías” (tabla 5.1), “híbridos” (tabla 5.2). En el Anexo V se amplía la información de cada vehículo:

	FABRICANTE	MODELO	VERSIÓN	SISTEMA HÍBRIDO	VELOCIDAD MÁX. (KM/H)	AUTONOMÍA (KM)
1	IVECO ESPAÑA S.L.	DAILY 35S Chasis Cabina Eléctrica	Chasis Cab. Eléctrica	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	70	120
2	IVECO ESPAÑA S.L.	Daily 65C Chasis Cabina Eléctrica	65C Chasis Cab Eléctr.	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	70	130
3	Albert Hidalgo	MODEC	Chasis Cabina	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	80	100
4	Tata Motors Limited	ACE Ducato Chassis Cabina N1-	Eléctrica	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	40	50
5	Micro-Vett Spa	DB(35S11) -Li(s)	Chassis Cabina	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	90	95
6	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER	TOP-DECK	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
7	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC.POWER	PICK:UP/R OLL BAR	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
8	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER	PICK_UP Pick Up/	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
9	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER NUEVO MODELO	Camión caja fija corta Big Deck/	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
10	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER NUEVO MODELO	Camión caja fija larga	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
11	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER	Chasis carrozable	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
12	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER NUEVO MODELO	Chasis Cab. Carrozable	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
13	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER	Basculante-tipper Tipper Deck	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
14	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER NUEVO MODELO	XL caja basculante Tipper Caja	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90
15	Piaggio & C, S.p.A.	ELECTRIC-POWER NUEVO MODELO	Basculante hierro	Híbrido según motorización: Motor eléctrico y baterías	57	90

Tabla 5.1. Características de los vehículos “eléctricos con baterías”. Fuente: [24].

	FABRICANTE	MODELO	VERSIÓN	SISTEMA HÍBRIDO	VELOCIDAD MÁX. (KM/H)	ACELERACIÓN 0-100KM/H
1	HINO	Hybrid 714	Serie 300	Motor eléctrico, térmico y baterías	116	
2	ISUZU	Elf Diesel Hybrid		Motor eléctrico, térmico y baterías		
3	MITSUBISHI	Fuso Canter	Eco Hybrid	Motor eléctrico, térmico y baterías		

Tabla 5.2. Características de los vehículos “híbridos”. Fuente: [24].

6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL VEHÍCULO A SIMULAR

El vehículo a simular, aunque pueda adoptar diferentes configuraciones en lo relativo a su sistema energético, deberá cumplir las especificaciones técnicas que se plantean a continuación para que los resultados de dichas simulaciones sean consistentes. Las especificaciones no responden a un modelo particular, sino que representan unos valores medios aceptables para un vehículo del segmento medio:

- Especificaciones carrocería:

Coefficiente aerodinámico:	0,39
Área frontal:	4,649m ²
Altura del centro de gravedad:	0,7m
Distribución de pesos (del/tras):	0,6
Batalla:	4m
Tracción del vehículo:	delantera

- Especificaciones para la masa del vehículo:

Masa del vehículo sin componentes de propulsión:	1400kg
Masa de los componentes de propulsión:	variable según configuración
Masa de la carga:	1200kg (aproximadamente el 75% del máximo permitido)

Nótese que se ha decidido no fijar una masa total, sino que se ha optado por imponer la masa del vehículo sin contabilizar la asociada a los componentes de tracción; de esta manera, el mayor o menor peso de un determinado sistema energético redundará en peores o mejores resultados para esa determinada configuración.

-Especificaciones para los neumáticos:

Coefficiente de rodadura estático:	0,012
Inercia:	6,534 kg/m ²
Radio:	0,33m

-Especificaciones auxiliares del vehículo:

Carga eléctrica (accesorios):	1000W
-------------------------------	-------

-Prestaciones a cumplir:

- a) Caso combinado (urbano-suburbano) →

Autonomía:	≥ 500km
Velocidad máxima:	≥ 120km/h
- b) Caso urbano →

Autonomía:	≥ 150km
Velocidad máxima:	≥ 90km/h

7. ESCENARIOS Y CICLOS DE FUNCIONAMIENTO. DEMANDA DE ENERGÍA PARA CADA CICLO

Para poder realizar una comparación energética entre los diferentes tipos de vehículos es necesario definir las características de los ciclos de uso del vehículo. A través de la asignación de la velocidad a la que se moverá el vehículo para cada instante de funcionamiento se simularán las condiciones normales de arranque, circulación a velocidad estable y frenada que se producen durante la conducción de los vehículos analizados.

Es bien sabido que el comportamiento energético de un vehículo no es el mismo en condiciones urbanas que en condiciones suburbanas. Por este motivo la comparación energética se realizará inicialmente en un ciclo mixto (ECE_EUDC_LOW), y posteriormente, una vez que se seleccione una arquitectura del vehículo determinada, se simulará un ciclo urbano (ECE), para ver las diferencias con el vehículo anterior.

La gráfica más representativa de un ciclo de funcionamiento es la de velocidad/tiempo. En el Anexo IV se puede encontrar más información de los ciclos.

- Ciclo 1: alterna zona urbana con suburbana, cubre 10,59km en 1224s y su velocidad máxima es de unos 90km/h.

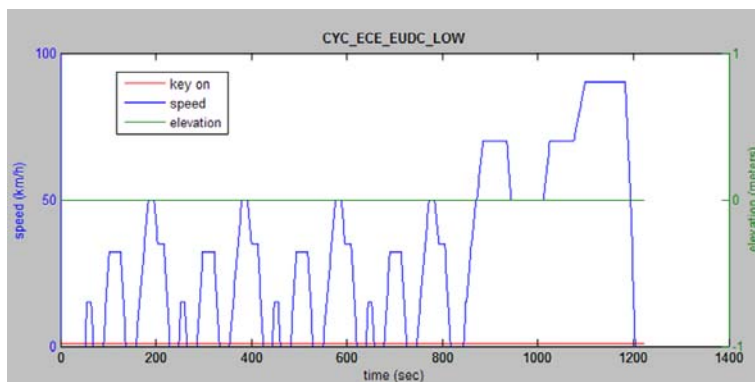


Figura 7.1. Gráfica tiempo-velocidad del ciclo combinado. Fuente: Advisor.

- Ciclo 2: es el de carácter más urbano, recorre 0,99km en 195s y su velocidad máxima es de unos 50km/h.

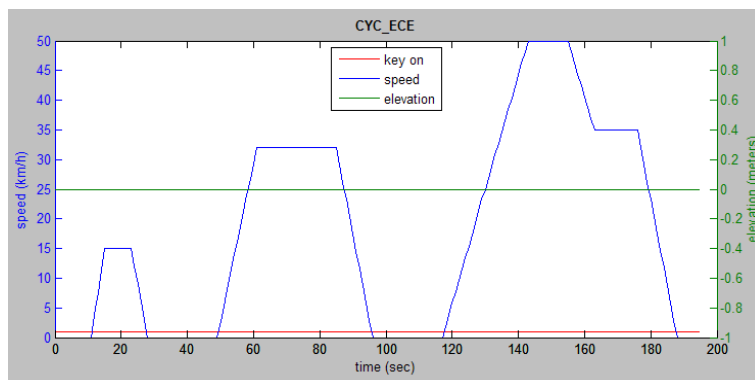


Figura 7.2. Gráfica tiempo-velocidad del ciclo urbano. Fuente: Advisor.

8. DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS Y EVOLUCIÓN JUSTIFICADA DE ALTERNATIVAS SEGÚN EL SISTEMA PROPULSOR DEL VEHÍCULO: CONVENCIONAL, HÍBRIDO, ELÉCTRICO PURO Y DE PILA DE COMBUSTIBLE

Una vez completada la primera parte del proyecto se procede a utilizar la herramienta informática de simulación de vehículos (*Advisor*). Esta primera fase de simulación consiste en la evolución justificada hacia el vehículo óptimo partiendo desde la configuración convencional. Para ello se sigue un determinado procedimiento y se plantean unos criterios de selección.

8.1. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS SIMULACIONES

Para llevar a cabo la simulación de un modelo propuesto se siguen aproximadamente los siguientes pasos (en el Anexo VI se describe este procedimiento con mayor detalle):

- Selección en la aplicación informática de la configuración energética a simular: vehículo convencional, eléctrico, híbrido o de pila de combustible.
- Introducción en el programa de las especificaciones técnicas descritas previamente, que serán comunes a todos los vehículos estudiados en este proyecto para que los resultados de todas simulaciones sean comparables.
- Selección del ciclo de funcionamiento, entre los descritos en el apartado 7, en los que se va a simular el vehículo.
- Simulación inicial. Comprobación del cumplimiento de las especificaciones técnicas propuestas relativas a prestaciones.
- Realización de sucesivas simulaciones variando tamaño de los sistemas de energía hasta lograr el mínimo consumo que cumpla las especificaciones de prestaciones.

8.2. CRITERIOS UTILIZADOS PARA JUSTIFICAR LA EVOLUCIÓN DE CONFIGURACIONES ENERGÉTICAS

El criterio principal que justifica el cambio de una a otra configuración energética es el coste de operación, es decir, el consumo. Éste se calculará inicialmente en el ciclo 1 del capítulo 7 de este estudio (corresponde al ECE_EUDC_LOW), por ser este un ciclo mixto con un entorno tanto urbano como suburbano. Para realizar la comparación se utilizará una unidad de medida común: el “litro equivalente de gasolina”, que representa la cantidad de gasolina a la que equivale la energía consumida, de manera independiente del combustible utilizado. Comentar también que el rendimiento que se utiliza en las posteriores tablas comparativas, es un coeficiente que calcula el programa en función del combustible utilizado, la energía almacenada y las pérdidas aerodinámicas y de rodadura. Este rendimiento no es el rendimiento real del vehículo pero sirve de referencia para comparar los diferentes vehículos.

Además se tendrá en cuenta el tiempo de recarga (cuando proceda) y que la solución propuesta no produzca emisiones contaminantes.

8.3. EVOLUCIÓN DE ALTERNATIVAS

- a) Caso combinado → El procedimiento a seguir es el siguiente: para cada alternativa se comenta, en primer lugar, en qué consiste su sistema energético, indicándose sus valores más representativos.

En segundo lugar se muestran los resultados más significativos: peso total del conjunto, datos de aceleración, velocidad máxima y la autonomía (obtenida a partir del consumo y de la masa del combustible). Asimismo se muestran el coeficiente del rendimiento que proporciona el programa, las emisiones de CO, HC, NO_x Y PM, en caso de existir, y el consumo (en litros equivalentes de gasolina). Por último, se realiza un pequeño comentario. Los resultados se encuentran ampliados en el Anexo VII.1.

-Vehículo convencional:

Su sistema energético consiste únicamente en un motor térmico. Se ha simulado un modelo de ciclo Otto y otro de ciclo Diesel. Las potencias de las opciones óptimas han sido 150kW en ambos casos. A continuación los resultados más destacados (tabla 8.1):

Modelo	Peso (kg)	0-100 km/h (seg)	V máx (km/h)	Autonomía (km)	Consumo (gasolina equiv.)	Rendimiento (%)	HC (gr/km)	CO (gr/km)	NO _x (gr/km)	PM (gr/km)
gasolina	3204	19,5	168,3	504,7	21,7	10,2	2,751	2,191	1,057	0
diesel	3431	15,8	134,7	505,9	16,9	13,6	0***	0***	3,056	0,185

Tabla 8.1. Resultados del vehículo convencional. Fuente propia. (***)Advisor no mostraba esos datos)

A la vista de la existencia de emisiones y de unos rendimientos muy bajos que conducen a elevados consumos energéticos (en litros equivalentes de gasolina cada 100km), se opta por incorporar un motor eléctrico y un sistema de almacenamiento de energía que trate de mejorar los resultados anteriores.

-Vehículo híbrido según motorización en paralelo:

También llamados híbridos totales. En este caso el vehículo puede funcionar con el motor eléctrico solamente, con el térmico o ambos a la vez. Normalmente, la primera fase de aceleración es totalmente eléctrica. Su sistema energético consiste en un motor térmico y baterías de plomo ácido o de ión-litio, según la opción: Además, ambas configuraciones cuentan con un motor eléctrico. La denominación de híbridos paralelos se debe a que los motores eléctrico y térmico actúan en paralelo sobre el sistema de transmisión. A continuación, los principales resultados (tabla 8.2):

Modelo	Peso (kg)	0-100 km/h (seg)	V máx (km/h)	Autonomía (km)	Consumo (gasolina equiv.)	Rendimiento (%)	HC (gr/km)	CO (gr/km)	NO _x (gr/km)	PM (gr/km)
paral. pb	3195	28,3	127,3	505,9	14	15,7	0,933	1,107	0,286	0
paralelo li	2946	29,5	124,5	505,8	13,3	15,9	0,892	1,058	0,272	0

Tabla 8.2. Resultados más destacados vehículo híbrido paralelo. Fuente propia.

Con estas configuraciones los tamaños de los motores necesarios disminuyen. Además, éstos son utilizados de una manera más eficiente, lo que conduce a una mejora en el rendimiento, y por tanto en los consumos, así como en las emisiones contaminantes (ver Anexo VII.1).

-Vehículo híbrido según motorización en serie:

Los híbridos serie son vehículos eléctricos con un pequeño motor térmico de gasolina. El motor eléctrico es el único que impulsa al vehículo. El motor térmico mueve un generador que envía la corriente al motor eléctrico o a las baterías, según las circunstancias. No cuentan con ninguna conexión mecánica directa entre el motor de combustión interna y las ruedas. El motor térmico puede estar apagado y ponerse en marcha solamente cuando se va a agotar la energía en las baterías.

Modelo	Peso (kg)	0-100 km/h (seg)	V máx (km/h)	Autonomía (km)	Consumo (gasolina equiv.)	Rendimiento (%)	HC (gr/km)	CO (gr/km)	NOx (gr/km)	PM (gr/km)
serie pb	3262	17,6	139,8	505,9	15,9	14	1,118	1,343	0,376	0
serie li	3000	38,4	122,6	505,8	17,4	12,2	1,195	1,417	0,406	0

Tabla 8.3. Resultados más destacados vehículo híbrido serie. Fuente propia.

En este caso el peso del vehículo aumenta un poco debido a los dos motores, el generador y las baterías. Destacar el aumento de las emisiones con respecto al caso anterior.

-Vehículo híbrido según motorización en paralelo-serie:

El vehículo híbrido paralelo con generador independiente también se le clasifica como vehículo híbrido "paralelo-serie". Esta configuración combina las ventajas de ambos sistemas y es la más utilizada por los fabricantes de automóviles como por ejemplo: Toyota en su modelo Prius.

Modelo	Peso (kg)	0-100 km/h (seg)	V máx (km/h)	Autonomía (km)	Consumo (gasolina equiv.)	Rendimiento (%)	HC (gr/km)	CO (gr/km)	NOx (gr/km)	PM (gr/km)
mixto										
pb	3204	23,6	130,2	505,9	15	14,7	1,018	1,209	0,309	0
mixto li	2959	30,1	125,7	505,8	14,4	14,7	0,961	0,139	0,295	0

Tabla 8.4. Resultados más destacados vehículo híbrido paralelo-serie. Fuente propia.

La siguiente propuesta consiste en llevar al extremo la configuración híbrida hasta el punto de eliminar el motor convencional, es decir, el vehículo eléctrico puro.

-Vehículo según motorización eléctrica pura:

En este tipo de vehículos el movimiento se produce gracias a un motor eléctrico que transforma energía eléctrica en energía mecánica mediante interacciones electromagnéticas. Las fuentes de energía eléctrica pueden ser baterías o placas solares.

En este trabajo se utilizarán baterías de ión litio, de plomo ácido y de níquel metal hidruro.

Alcanzar el requerimiento de 500km de autonomía resulta complicado, por lo que se han simulado casos con baterías de ión-litio de alta capacidad (unas tres veces más que las de la configuración anterior), de níquel-metal hidruro y de plomo-ácido (este último tipo para ilustrar la imposibilidad de alcanzar el objetivo de autonomía). Los resultados destacados se muestran en la siguiente tabla (tabla 8.5):

Modelo	Peso (kg)	0-100 km/h (seg)	V máx (km/h)	Autonomía (km)	Consumo (gasolina equiv.)	Rendimiento (%)	HC (gr/km)	CO (gr/km)	NOx (gr/km)	PM (gr/km)
eléc. pb	3492	46,1	119,5	91,6	5	54,3	0	0	0	0
eléc. li	3485	46	119,6	132,9	4,5	54,6	0	0	0	0
eléc.nimh	3497	46,2	119,5	188,2	4,6	54	0	0	0	0

Tabla 8.5. Resultados más destacados vehículo eléctrico puro. Fuente propia.

Con esta configuración se consigue por primera vez eliminar las emisiones contaminantes. Sin embargo, para intentar satisfacer el requerimiento de 500km de autonomía, el peso ha de aumentar mucho.

La limitación común a todos los tipos de batería es el alto tiempo de recarga, con valores del orden de “horas”. Por este motivo se decide incorporar un dispositivo de generación de energía eléctrica in-situ, la pila de combustible, conservando el resto de elementos, puesto que se muestran adecuados a la hora de conseguir una elevada eficiencia. Se propone, por tanto, como siguiente configuración, el vehículo de pila de combustible.

-Vehículo híbrido según motorización con pila de combustible:

En los FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles) su sistema energético es híbrido según sistema energético en serie, ya que cuenta con pila de combustible y baterías como sistemas de energía. La tracción la proporciona un motor eléctrico, al cual alimentan las baterías que son recargadas por la pila de hidrógeno, según la demanda. A continuación, los principales resultados (tabla 8.6):

Modelo	Peso (kg)	0-100 km/h (seg)	V máx (km/h)	Autonomía (km)	Consumo (gasolina equiv.)	Rendimiento (%)	HC (gr/km)	CO (gr/km)	NOx (gr/km)	PM (gr/km)
pila pb	3209	41,6	121,6	505,9	8,2	27,2	0	0	0	0
pila li	2979	38	122,5	505,9	7,8	27,2	0	0	0	0
pila nimh	3140	40,5	122	505,8	7,9	27,8	0	0	0	0

Tabla 8.6. Resultados más destacados vehículo pila de hidrógeno. Fuente propia.

Esta es la opción seleccionada, ya que se trata de un sistema energético no contaminante que cumple con los requerimientos de autonomía y prestaciones. Además se puede recargar rápidamente (tiempos del orden de los minutos) y consigue los mejores resultados de eficiencia y consumo, sólo superado por los vehículos eléctricos puros, los

cuales, como ya se comentó, se descartan por su corta autonomía y sus largos tiempos de recarga (del orden de horas), así como por su elevado peso o precio, según el tipo de batería elegido.

- b) Caso urbano → Del mismo modo, para realizar otro caso de análisis se simuló un recorrido urbano (ciclo ECE), en el que se buscaban unas prestaciones del vehículo de 150km de autonomía y una velocidad máxima de al menos 90km/h. A continuación se muestra una tabla con los resultados más importantes.

Modelo	Peso (kg)	0-50 km/h (seg)	V máx (km/h)	Autonomía (km)	Consumo (gasolina equiv.)	Rendimiento (%)	HC (gr/km)	CO (gr/km)	NOx (gr/km)	PM (gr/km)
gasolina	2909	11,4	113,7	150	17	8,3	1,29	1,58	0,285	0
diesel	2909	12,3	113,2	149,7	14,4	9,8	0,179	0,295	1,798	0,063
paralelo pb	3270	12,2	107,3	150	14,9	10,2	1,022	1,233	0,278	0
paral. li	2858	10,6	107,2	150	14,1	9,9	1,006	1,214	0,272	0
serie pb	3332	17,2	107	149,8	21,3	7,3	1,548	1,923	0,533	0
serie li	2920	14,8	103	150	19,9	7,1	1,406	1,683	0,48	0
mixto pb	3004	15,4	96,2	149,9	15,4	9,4	1,1	1,328	0,31	0
mixto li	2911	9,9	107,3	150	15,1	9,4	1,08	1,304	0,302	0
eléct. pb	4658	6,5	158,1	150,1	6,2	40	0	0	0	0
eléct. li	3500	4,7	157,7	148,2	4,4	41,2	0	0	0	0
el. nimh	4001	5,6	157,9	150,1	5	39,8	0	0	0	0
el. disco	2877	4	157,4	150	4,3	38,1	0	0	0	0
pila pb	3038	21,3	90,4	150	7,8	18,9	0	0	0	0
pila li	2944	15,5	97,8	150,1	7,7	18,5	0	0	0	0
pila nimh	3000	15,4	100,8	150	7,6	19,1	0	0	0	0
pila disco	2937	15,9	98,6	150	7,9	18,3	0	0	0	0

Tabla 8.7. Resultados más destacados de los vehículos en ciclo urbano. Fuente propia.

Con respecto al caso “b” destacar que, en general, en cuanto a las emisiones se produce un pequeño aumento debido al constante paro y arranque en los semáforos de las ciudades, que es lo que se simula en este ciclo.

Teniendo en cuenta que la arquitectura energética utilizada para los dos casos es distinta, debido a que los condicionantes de autonomía eran diferentes, se puede decir que los rendimientos son menores en el caso “b”, así como que el consumo de combustible es un poco mayor. Por último, se selecciona el vehículo eléctrico con baterías de ión-litio como opción óptima para el ciclo urbano, ya que tiene el mejor rendimiento y el menor consumo dando prácticamente la autonomía demandada.

9. DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE SEGÚN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO SELECCIONADO.

En el capítulo anterior se ha seleccionado el vehículo de pila combustible como la opción óptima del caso “a”, y el vehículo eléctrico con baterías de ión-litio para el caso “b”. En este capítulo se realizan varias propuestas de vehículo basado en pila de combustible en las que varía el sistema de almacenamiento de energía. Para el caso de vehículos con pila de combustible con baterías de plomo, litio y níquel, como ya han sido simulados, se amplía su descripción en el Anexo VII.2.

Comentar que para el caso “b”, se simuló con supercondensador y también con disco de inercia, y para ambas aplicaciones no se observaban mejoras con respecto a los vehículos con las baterías de ión-litio.

Vehículo de pila de combustible con supercondensador

Esta es una de las opciones que monta un sistema de almacenamiento de energía diferente de las baterías. Los supercondensadores que monta utilizan una tecnología relativamente reciente, por lo que su coste, ligeramente elevado, puede disminuir a largo plazo más rápido que los otros sistemas propuestos. Su densidad de potencia es muy alta, alrededor de un orden de magnitud superior al del resto de opciones. Sin embargo, su densidad energética es muy baja (unos 9Wh/kg), lo que obliga a utilizar muchas unidades para conseguir resultados aceptables. A continuación se muestra la curva de potencia (kW) vs estado de carga para el supercondensador utilizado en esta configuración (figura 9.1):

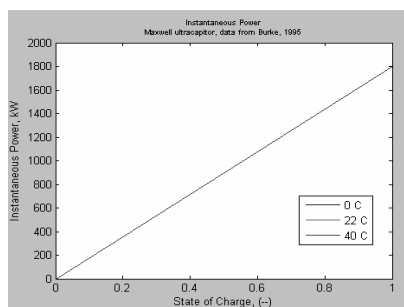


Figura 9.1. Gráfica potencia-nivel de carga del supercondensador empleado. Fuente: Advisor.

Vehículo de pila de combustible con disco de inercia

El disco de inercia es un sistema de almacenamiento de energía que, a priori, puede ofrecer buenos resultados. Sin embargo, puesto que la aplicación informática utilizada no permitía incorporarlo, no se ha podido simular para ser comparado con el resto de vehículos. No obstante, dado que se esperaban resultados interesantes, se ha tratado de simular dicho componente con una batería de plomo-ácido a la que se la han variado algunos parámetros para que se comporte de manera similar a un disco de inercia. En el Anexo VII.2 se amplía la información acerca del disco de inercia utilizado.

10. ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO, Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA ENTRE LOS VEHÍCULOS PROPUESTOS

En este apartado se optimiza cada una de las configuraciones propuestas en el apartado anterior y, tras el análisis de los resultados, se elige la alternativa considerada óptima.

10.1. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA

Tal y como se adelantaba en la introducción, el criterio principal a seguir será el de la eficiencia energética, denominador común a lo largo de todo este estudio. Sin embargo, en caso de que varias alternativas obtengan unos resultados similares, se pasará a considerar a grandes rasgos, los aspectos económicos que diferencien a ambas opciones.

Los principales resultados, ampliados en el Anexo VII.2, se muestran a continuación:

Modelo	Peso (kg)	0-100 km/h (seg)	V máx (km/h)	Autonomía (km)	Consumo (gasol equiv.)	Rendimiento (%)
pila pb	3209	41,6	121,6	505,9	8,2	27,2
pila li	2979	38	122,5	505,9	7,8	27,2
pila nimh	3140	40,5	122	505,8	7,9	27,8
pila superc.	3364	44	120,5	505,8	8	28,3
pila disco	2984	38,1	123	505,8	7,8	27,2

Tabla 10.1. Principales resultados de las simulaciones. Fuente propia.

10.2. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA

Después de observar los resultados de las simulaciones de cada una de las alternativas optimizadas para obtener el consumo más bajo posible, se descarta el uso de baterías de plomo-ácido. Aunque el coste de las baterías de plomo para esta configuración es bajo, unos 355€ (50€/kWh), su menor eficiencia y mayor consumo hace que se descarte. El modelo que utiliza baterías de níquel-metal hidruro consigue unos resultados algo mejores, pero que no justifican el elevado precio de su sistema de almacenamiento, unos 1436€ (150€/kWh), puesto que recurre a una cantidad elevada de módulos, cuyo precio unitario es alto. Por otro lado, se tiene que los modelos que montan baterías de ión-litio, supercondensadores y discos de inercia, consiguen los mejores resultados. Para decidir entre ambos se tienen en cuenta también consideraciones económicas; el modelo de litio se beneficia de necesitar poca cantidad de baterías debido a sus altas prestaciones, con lo que consigue un bajo coste en ese aspecto, unos 256€ (200€/kWh), a pesar de ser dispositivos de alto coste unitario. Sin embargo, se tiene que los supercondensadores (30000-50000€) y los discos de inercia tienen un coste muy alto en la actualidad, lo que les impide ser una alternativa real. Esto se debe a que se trata de unas tecnologías menos maduras que la de las baterías, y que se necesita un alto grado de calidad, tanto en diseño como en materiales, por temas de seguridad en caso de accidentes.

También se puede ver en el Anexo VII.2 el análisis del reparto de “potencia aportada por cada sistema de energía”, donde el de ión-litio es el más productivo en ese sentido.

En base a los argumentos esgrimidos, se decide que el vehículo con el que se continúa este estudio es el de pila de combustible con batería de ión-litio.

11. ESTUDIO DEL AHORRO DE EMISIONES Y GASTOS CONSEGUIDO CON EL VEHÍCULO DIMENSIONADO

Para el estudio de posibles ahorros, tanto de emisiones como de gasto económico, se ha tomado como referencia una empresa nacional que disponga de una flota de 10 camiones con los que trabaja 250 días al año, durante un periodo de 10 años. Por una parte se compara un vehículo convencional con motor de gasolina (*vehículo-1*) con un vehículo eléctrico con baterías de litio (*vehículo-2*), para el ciclo urbano, y por otro lado, se compara un vehículo convencional con motor de gasolina (*vehículo-3*) con un vehículo de pila de hidrógeno con baterías de litio (*vehículo-4*), para el ciclo combinado. De este modo se puede hacer una buena estimación del ahorro que se podría conseguir para ambos ciclos.

En cuanto al ahorro de emisiones se puede observar en la siguiente tabla la alta contaminación que producen los vehículos con motor de gasolina con respecto a los no contaminantes, tanto en un ciclo urbano (para un total de 3.750.000 km) como en el ciclo combinado (para un total de 12.500.000 km). En el Anexo VIII se amplía información.

	CICLO	MOTOR	HC	CO	NO _x	PM
1	urbano	gasolina	4,84	5,93	1,07	0
2	urbano	eléctrico - Li	0	0	0	0
3	combinado	gasolina	34,39	27,39	13,21	0
4	combinado	pila H ₂ - Li	0	0	0	0

Tabla 11.1. Toneladas totales emitidas por los 10 vehículos durante 10 años. Fuente propia.

Pero si se analiza también la procedencia de la electricidad que es suministrada a los vehículos eléctricos, se observa que en España el 30,44% proviene de energías no renovables como el carbón, el fuel, el gas o los ciclos combinados, procesos en los cuales se emite CO₂. Así como en la producción de hidrógeno, exactamente lo mismo. En el Anexo VIII se calculan las emisiones de CO₂ que se emitirían en los procesos de generación, tanto de electricidad como de hidrógeno, para recorrer todos los kilómetros durante los 10 años del caso de estudio.

Para el cálculo del ahorro económico, se tiene en cuenta el consumo de los distintos vehículos así como una estimación del precio inicial, pero aspectos de mantenimiento del vehículo y otros gastos varios se han desestimado. En el Anexo VIII se ve la estimación de la evolución de los precios tanto de la gasolina, como de la electricidad y del hidrógeno para los próximos 10 años.

En la siguiente gráfica se muestran los gastos acumulados para cada vehículo, sin olvidar que los vehículos de ciclo urbano recorren muchos menos kilómetros que los del

ciclo combinado, y que no se pueden comparar entre sí ya que se trata de vehículos distintos en ambos casos.

Destacar que los vehículos de gasolina, a pesar de tener un precio inicial muchísimo menor, en ambos casos consumen muchos más, llegándose a producir, como se puede ver en la figura 11.2, un ahorro de unos 25.000€ para el caso urbano, y de unos 140.000€ para el caso mixto al final de los 10 años, y en los siguientes años seguirá creciendo muy rápidamente.

Otro dato a favor de los vehículos no contaminantes son los pocos gastos de mantenimiento que tienen a lo largo de su vida de funcionamiento.

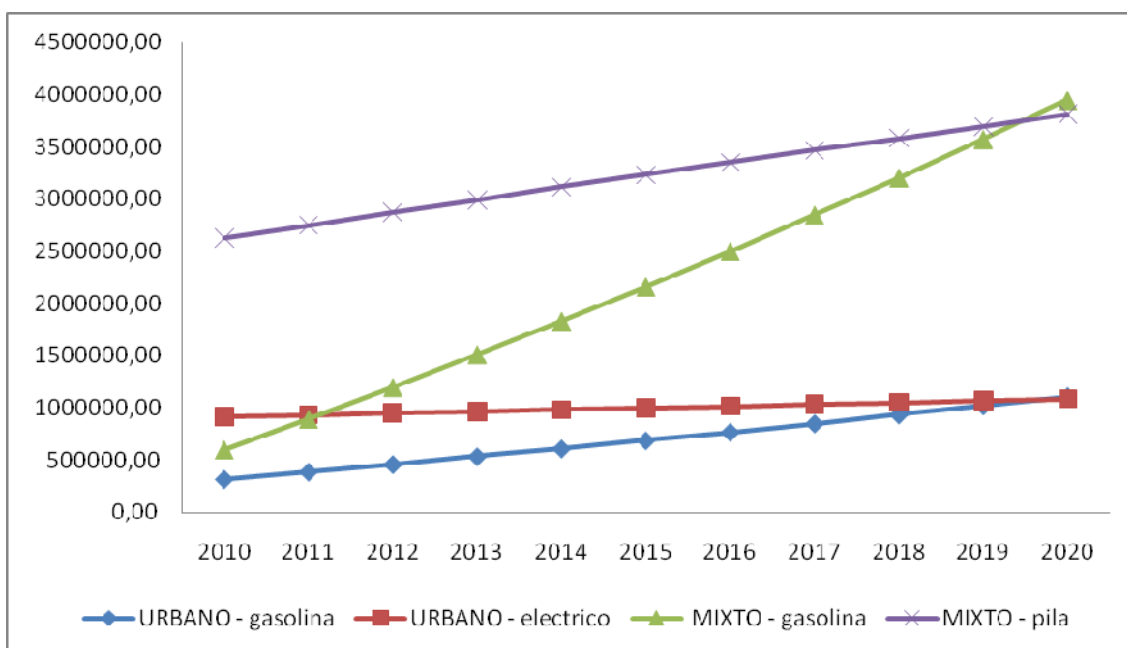


Figura 11.1. Gasto económico acumulado para cada vehículo. Fuente propia.

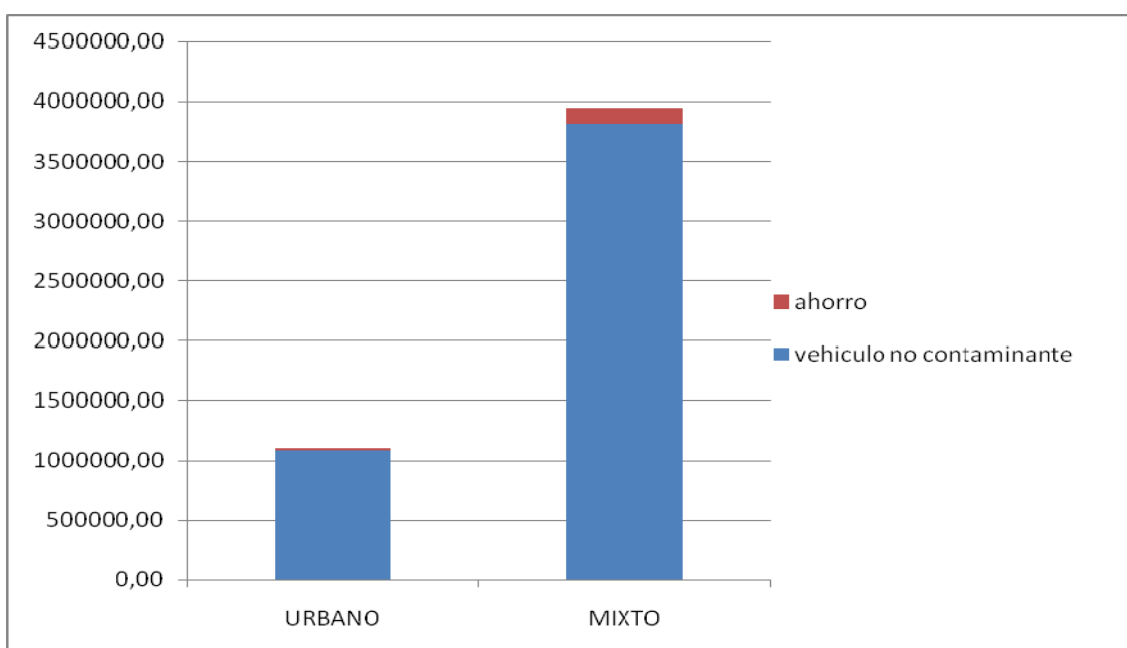


Figura 11.2. Ahorro económico para cada ciclo. Fuente propia.

12. CONCLUSIONES

- Este estudio proporciona un punto de partida a la hora de buscar el diseño óptimo del sistema energético de un vehículo comercial ligero no contaminante, una vez conocido el ciclo en el cual va a desempeñar su función.

- Se ha apreciado durante este estudio que la importancia de realizar un correcto dimensionamiento en función del ciclo de utilización es muy alta, ya que llegan a aparecer diferencias de consumo muy elevadas para vehículos que utilizan un mismo tipo de sistema energético.

En el caso del ciclo urbano el vehículo con mejores prestaciones era el eléctrico con baterías de ión-litio, en cambio para el ciclo combinado como eran muchos más kilómetros este tipo de vehículos no disponían de la autonomía suficiente, con lo que los vehículos de pila de hidrógeno con baterías de ión-litio eran los que menor consumo y mayor rendimiento obtenían.

- Los rendimientos de los vehículos de pila de combustible son muy superiores a los convencionales, lo que posibilita contrarrestar otros aspectos, como por ejemplo el elevado coste de producción del hidrógeno. En un escenario mixto, la eficiencia del vehículo de pila de combustible es del 27,2%, muy por encima del 10,2% y del 13,6% que consiguen los vehículos convencionales de ciclo Otto y Diesel respectivamente.

Además se ha apreciado que esta diferencia de rendimientos es más acusada cuanto más urbano es el carácter del ciclo; en el ciclo más urbano la diferencia de rendimientos alcanza las cinco veces, cuando en los ciclos más suburbanos esta diferencia de rendimientos apenas alcanza el doble.

- Se consiguen emisiones nulas de contaminantes, al menos durante la circulación de los vehículos seleccionados. Se puede discutir acerca de la contaminación generada por la producción de la electricidad y del hidrógeno, que variará según el método utilizado en su obtención, si bien los elevados rendimientos del vehículo eléctrico y del vehículo de pila de combustible pueden contrarrestar esta circunstancia.

- El desembolso inicial de la compra de los vehículos seleccionados son bastante más altos que los vehículos de gasolina o diesel actuales, pero se ha demostrado que a la larga el ahorro que suponen este tipo de vehículos es muy significativo debido al poco consumo que tienen.

- El vehículo de pila de combustible con disco de inercia o supercondensadores puede ser una buena opción a largo plazo, siempre y cuando los costes de este componente disminuyan, se solucionen las cuestiones relativas a la seguridad (en estudio actualmente) y sus características sigan mejorando tal y como se prevé.

13. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- En general, se plantean varias vías de investigación para continuar hacia una tesis doctoral. A continuación se describe la principal línea que se piensa seguir:
 - Realizar simulaciones no solamente con los ciclos estándar de la Comunidad Europea, sino que también sería de gran interés graficar distintos ciclos reales que realizase una empresa determinada en una ciudad, de este modo se verían resultados de una aplicación real muy validas para una empresa, y para el diseño y dimensionamiento de sus vehículos. De igual modo, se podría extender al conjunto de empresas de reparto de toda una ciudad, y así ver el ahorro económico que supondría cambiar el parque de vehículos de reparto actual de dicha ciudad, por vehículos no contaminantes. Así mismo, el análisis exhaustivo de la disminución de las emisiones contaminantes que supondría la introducción y aplicación de nuevas tecnologías híbridas en el software informático, ampliando las ya utilizadas en este trabajo.
- Otras posibles líneas de investigación relacionadas con este TFM son:
 - Investigación en aplicación de nuevos tipos de baterías, y en general, en nuevos sistemas de acumulación de energía.
 - Vehículos híbridos, ya que es la mejor tecnología disponible hoy en día para favorecer la reducción de CO₂ y otras emisiones nocivas.
 - Inserción de los discos de inercia y los supercondensadores como sistemas de energía secundarios en diferentes tipologías de vehículos.
 - Vehículos eléctricos de baterías, ya que es la tecnología de cero emisiones para la movilidad urbana diaria, ya sea para reparto de mercancías en las ciudades como para uso particular en los desplazamientos diarios dentro del núcleo urbano.
 - Análisis exhaustivos de los contaminantes emitidos desde el yacimiento hasta el surtidor (“*well to tank*”), así como desde el surtidor hasta las ruedas (“*tank to wheels*”), para las distintas fuentes de energía existentes en los vehículos híbridos, ya que en este trabajo principalmente se ha centrado la atención en las emisiones “*tank to wheels*”, y no en todas, ya que el programa simulador no facilitaba todos los contaminantes emitidos.
 - Vehículos eléctricos de pila de combustible, debido a que es la solución definitiva para alcanzar la movilidad sostenible, de cero emisiones, tanto para ciudad como para grandes desplazamiento.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. Arquitectura de vehículos y sistemas de propulsión, M. Maza, E. Larrodé. Máster en Sistemas Mecánicos. Universidad de Zaragoza. 2010.

Libros:

2. “The electric and hybrid electric car”, Michael H. Westbrook
3. “Battery reference book”, T.R. Crompton

Artículos técnicos:

4. F. Cebrián, E. Larrodé, J. Gallego, “Optimum Design of Hybrid Powertrain Systems for Non Emission Vehicles”, University of Zaragoza, 2007.
5. K.T. Chau, Y.S. Wong, “Hybridization of energy sources in electric vehicles”, The University of Hong Kong, 2000.
6. Y.L. Zhou, “Modeling and Simulation of Hybrid Electric Vehicles”, University of Science & Tech. Beijing, 2005.
7. V. Bršlica, “Super-capacitor Integration into Hybrid Vehicle Power Source”, University of Defence in Brno, 2008.
8. J. Bravo, C.M. Silva, T.L. Farias, “Simulation of hybrid electrical vehicles”, Technical University of Lisbon, Portugal, 2006.
9. R. Bargalló, J. Llaverías, H. Martín, “El vehículo eléctrico y la eficiencia energética global”, Polytechnic University of Cataluña, Spain, 2009.

Páginas de internet:

- | | |
|--|--|
| 10. US Department Of Energy: | www.energy.gov |
| 11. AVL GMBH: | www.avl.com |
| 12. Ovonics: | www.ovonic.com |
| 13. Maxwell Technologies: | www.maxwell.com |
| 14. Green Car Congress: | www.greencarcongress.com |
| 15. Hybrid Cars: | www.hybridcars.com |
| 16. Moteur Developpment Internacional: | www.theaircar.com |
| 17. Toyota: | www.toyota.com |
| 18. Honda: | www.automobiles.honda.com |
| 19. General Motors: | www.gm.com |
| 20. PSA Group: | www.psa-peugeot-citroen.com |
| 21. Fiat: | www.fiat.com |
| 22. Lexus: | www.lexus.com |
| 23. Ford: | www.fordvehicles.com |
| 24. Proyecto Movele: | movele.ayesa.es/movele2/ |
| 25. REE, Red Eléctrica de España: | www.ree.es |